

酸性雨に対する日本の主要樹種の酸中和特性

垣原登志子¹, 小林範之¹, 河野修一¹, Yea Sun Young², Kun-Woo Chun³, 江崎次夫¹

Acid neutralization characteristics of some Japanese tree species from acid rain

Toshiko Kakihara¹, Noriyuki Kobayashi¹, Shunichi Kohno¹, Yea Sun Young², Kun-Woo Chun³ and Tsugio Ezaki¹

Abstract: A study was conducted from 1997 to 2004, on the conifer forest of Ehime University to clarify the acid deposition from acid rain. The pH of the most rain was less than 4.59. In conifer forests, the pH of throughfall and stemflow were lower and the EC was greater than that of rainfall. The pH of rainfalls decreased as EC increased, especially at the stemflow of *P. densiflora* S.et.Z. and *P. thunbergii* Parl. The pH of stem flow of *P. densiflora* S.et.Z. and *P. thunbergii* Parl. were related with the pH of rainfalls at the opening. However the pH of stemflow of *Cryptomeria japonica* D. Don kept even values irrespective of that of rainfall. Ionic concentration of stemflow was greater than that of rainfall. The concentrations of sulfate and nitrate of throughfall and stem flow were higher than those of the rainfall because of dry deposition and concentration on the canopy and trunk. Obvious acidification of rainfall, throughfall or stem flow could not be observed in this study site.

1 はじめに

大気汚染物質は気象条件によっては発生源から数千 km離れた地域にも越境していることがある。その代表的な現象が酸性雨で、広域で観測されている。酸性雨は直接あるいは間接的に水域をはじめ農産物や森林、建造物などが影響を及ぼしている。1970年代からドイツのシュバルツバルト(黒い森)の被害に代表されるようにヨーロッパでは非常に深刻な問題となっているおり、北米や中国においても大規模な被害が報告されている。

酸性雨の主たる原因となる物質はSO_xであるが、世界の総SO_x排出量の15%をアジアで排出しており、その内の70%が工業等の発展が著しい中国からである。また中国の排出量も日本や韓国に比べて多くなっている。日本の降水はpHの年平均値が4.6-5.1である。都市部周辺では降4.5に近くなり、北米やヨーロッパとほぼ同程度に酸性化している⁵⁾。

酸性雨が森林生態系に与える影響としては、樹木の衰退、土壌の酸性化、水生生物の死滅などが指摘されている。小雨や霧雨は粒子が小さく、表面積が大きいので酸性物質の溶け込む量が多くなる。また、粒子の中に含まれる水分も少ないため中性化が進まず、非常に酸性度の強い水滴となる。このように、酸性度の強い霧(酸性霧)が長時間樹木に付着すると、樹木に与える影響も大きくなる。さらに樹木の樹幹流が土壌に浸透すると、植物の成長に必要な塩基類が土壌から溶脱し、また植物に有害なAl³⁺やMn²⁺等も土壌から溶出するため根系の活力を低下させる。土壌の酸性化現象は、土壌を形成している母岩の性質により異なり、花崗岩などを母岩とする土壌は緩衝能が低く、反対に堆積岩や石灰岩を母岩とする土壌の緩衝能は高い。しかし、酸性雨等の影響が大きくなると土壌に影響を

及ぼす可能性が大きくなる。

一方、森林には一般的に酸性雨に対し緩衝機能があると言われているが、日本でも各地で森林の枯損が指摘されている。特に日本海側の海岸林や関東地方の埼玉、群馬、茨城などの平野部ではスギ老齢木の先端枯れなどの衰退現象が発生している。本研究では、酸性雨に対する緩衝能は樹種によっても異なることが予想されるため、針葉樹と広葉樹の酸性雨に対する樹種特性を明らかにすることを目的に調査を行なった。

2 調査地および調査概要

2.1 調査地の概要および採水場所

調査地点を図1に示す。調査地は愛媛県松山市米野町の愛媛大学農学部附属演習林であり、測定地点は2カ所である。地点1は演習林内の標高550m-950mの間に位置する。四国の山林の大部分がスギ、ヒノキの人工造林地によるものであるが、地点1では、森林面積の50%(約180ha)に天然生の二次林が残っている。地点2は、演習林の研究棟周辺であり標高380-440mに位置し、この地点はスギおよびヒノキの造林地である。

2.2 測定項目および測定機器

採水は林外雨(降雨)、林内雨、樹幹流について行ない、測定項目はpH、EC、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺の10項目である。林外雨と林内雨は、酸性雨分取器レインゴーランドを用いて採取した。樹幹流の採水は、佐々らが開発した綿製網体(ガーゼ)を利用した。採水は一降雨毎に行なった。なお、pHとECは未濾過のまま現地で行ったが、他の項目については研究室に持ち帰り、0.2μmのMFで濾過したものを用いた。測定機器は、pHはハンナポータブル式pHメーター(HI-9024C)を、ECはハンナポータブル式導電率計(H-8633)を用いた。陰イオンの測定はイオンクロマトグラフィー(Shimadzu, LC-10)で、陽イオン分析は分光光度計(Shimadzu, AA-1600)を用いて測定した。調査は1997年11月から2004年8月までの期間実施した。

¹愛媛大学農学部, Faculty of Agriculture, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8566 Japan

²愛媛大学大学院連合農学研究科博士課程, Ph.D. Student, the United Graduate of Agriculture Sciences, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8566 Japan

³江原大学校山林科学大学, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon, 200-701 Korea



愛媛大学農学部付属演習林

図1：調査地点

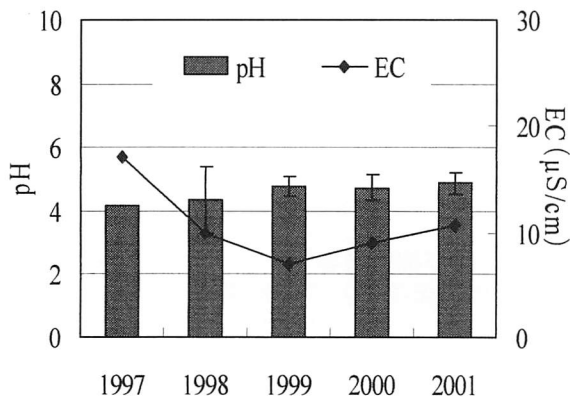


図2：林外雨のpH値とEC値

来し、これらは自然発生によるものと人為的なものに区分される。SO₄²⁻やNO₃²⁻の割合が大きい場合は人為発生に由来し、測定場所による影響が大きい²⁾。本調査地の特徴としては、測定年により多少異なるがSO₄²⁻やNO₃²⁻の割合が大きいことから工場や自動車などからの排ガスの影響が大きいと思われる。

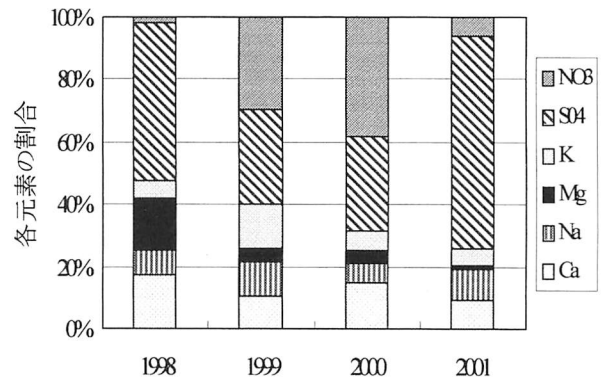


図3：林外雨の化学性

3.2 林外雨と林内雨および樹幹流のpH値濃度¹⁾³⁾

表1に測定木の概要を、図4に樹種別の林内雨と樹幹流のpH値を示す。針葉樹の林内雨は3.4-5.01の範囲で平均値は4.29、広葉樹は4.8-6.24の範囲で平均値は5.39、モウソウ竹は3.61-6.37の範囲で平均値は5.07であった。針葉樹の林内雨pH平均値と林外雨(4.59)のpH平均値はほぼ同じ値であったが、広葉樹とモウソウ竹の林内雨pH平均値は、林外雨のpH平均値に比べ高い値を示す傾向がみられた。この結果よりモウソウ竹と広葉樹の各林分の林冠は雨水の酸性度を低下させる機能があると考えられる。

また針葉樹と広葉樹のpH最小値の差は1.0以上であり、針葉樹では林外雨pH平均値より低い値であることがわかった。一般的には酸性雨に対する植物の感受性順位は、広葉樹>針葉樹であるといわれているが、同じような傾向を示した。

3 結果および考察

3.1 林外雨(降雨)のpH値およびEC値濃度と化学性

図2に林外雨のpHとECの経年変化を示す。なおエラーバーは標準誤差を示している(以降の図も同様)。調査期間中のpH値は4.18-4.89の範囲で、平均値は4.59であり、測定年別による大きな変動は認められなかった。また調査期間を通して酸性雨のpH基準値(pH5.6)を上回った回数は1回のみであり、比較的酸性度合いの強い酸性雨が降っていると考えられる。調査期間中のEC値は2.8-47.6μS/cmの範囲で、平均値は9.47μS/cmであった。pHと同様に測定年による大きな変動は認められなかった。また季節別ではpH値には大きな変化がみられなかったが、EC値は4-6月に高い値を示す傾向があったことを確認している。

図3に林外雨の化学組成割合を示す。林外雨に含まれる各種溶存元素は、大気中の粒子物質やガス状物質に由

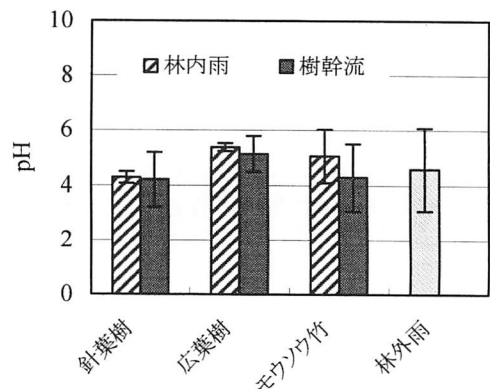


図4：林内雨と樹幹流のpH値

表 1:測定木の概要

NO	樹種	胸高直径(cm)	樹高(m)	標高(m)	林齢年(年)
1	スギ ①	32.0	28.0	350	62
2	スギ ②	33.7	26.0	550	62
3	ヒノキ ①	27.7	25.0	560	53
4	ヒノキ ②	32.0	26.0	560	53
5	アカマツ	9.2	2.8	400	9
6	クロマツ	5.0	1.9	400	8
7	ミズキ ①	36.7	16.0	690	56
8	ミズキ ②	31.8	15.0	700	56
9	ケヤキ ①	30.7	13.0	700	51
10	ケヤキ ②	21.0	11.0	690	41
11	ヤマザクラ ①	29.6	15.0	700	55
12	ヤマザクラ ②	36.5	12.0	710	55
13	モウソウ竹	11.3	16.0	440	8

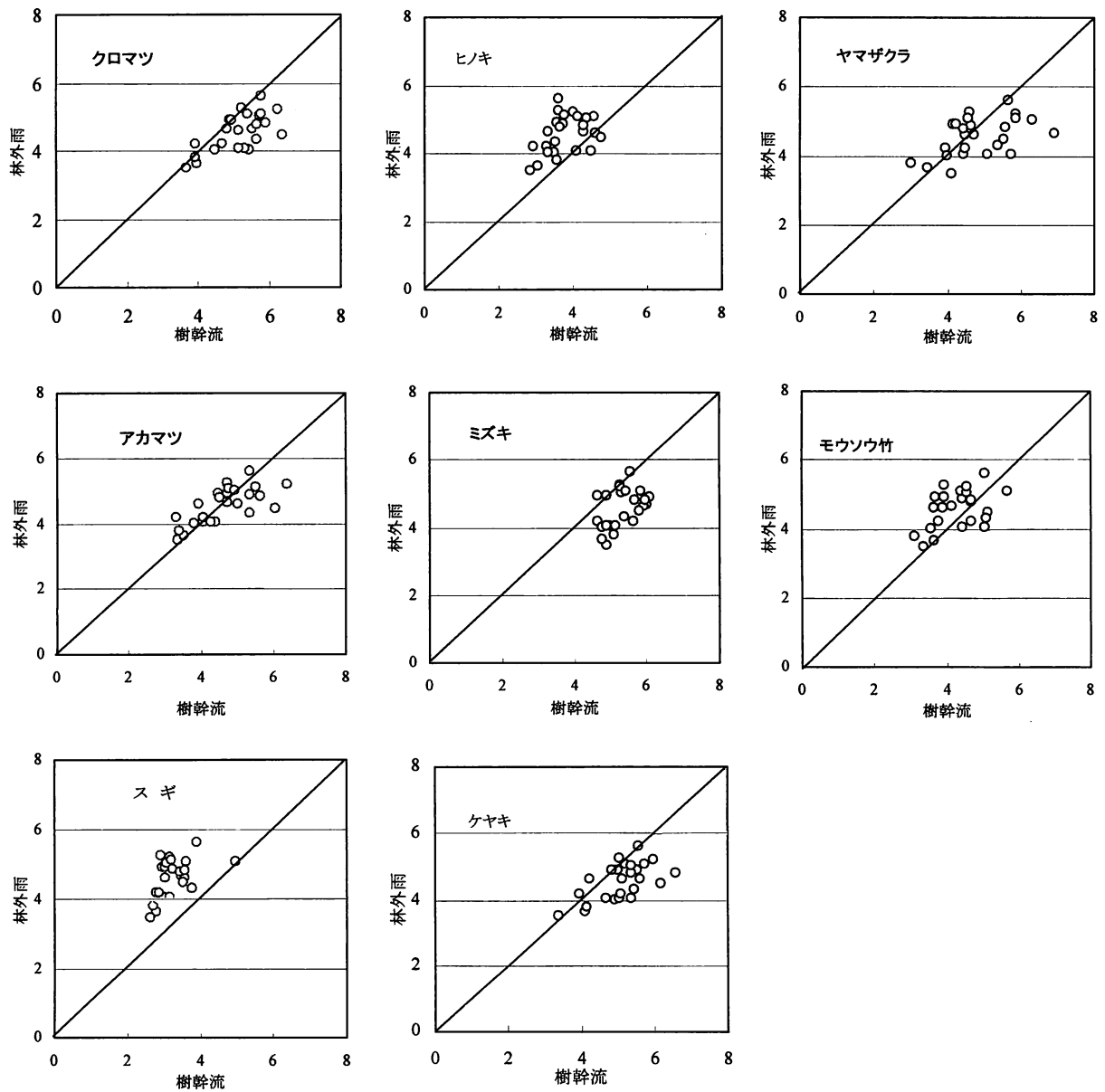


図 5 : 降雨と樹幹流 pH 値との関係

針葉樹の樹幹流pH値は2.61-6.04の範囲で平均値は4.22, 広葉樹は3.38-6.24の範囲で平均値は5.14, モウソウ竹は3.12-5.67の範囲で平均値は4.3であった。針葉樹とモウソウ竹の樹幹流pH平均値は, 林外雨(4.59)のpH平均値より低い値を示した。林内雨と樹幹流を比べると, 全ての樹種において樹幹流は低い値を示すことがわかった。各樹種における林内雨のpH平均値と樹幹流のpH平均値の差は, 針葉樹, 広葉樹ともほぼ同じであった。また針葉樹と広葉樹の樹幹流pH値幅は3.0近くあることから, 樹木により差があると推察される。次に林外雨のpH値と樹幹流pH値との関係について検討をおこなった。図5に樹種毎の結果を示す。調査した樹木の中で, 林外雨とアカマツ, クロマツの樹幹流には強い相関が認められたが, スギをはじめ他の樹木は樹幹流と林外雨との間には強い相関は認められなかった。スギ, ヒノキは林外雨のpH値にかかわらず樹幹流のpH値は2.0-4.0と低い値であった。

ミズキ, ケヤキ, モウソウ竹は林外雨と樹幹流のpH値がほぼ同じ値であった。

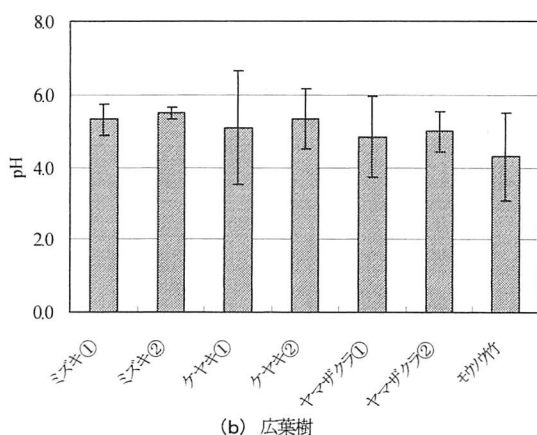
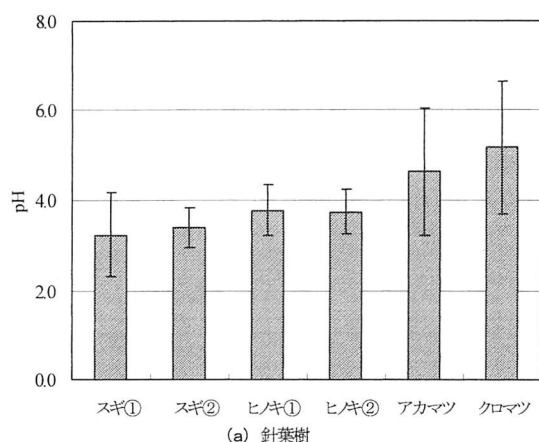


図6: 樹木別の樹幹流 pH 値

図6(a)に針葉樹の樹幹流pH値を示す。スギ①は2.61-4.96の範囲で, 平均値は3.24, スギ②は2.65-4.13の範囲で平均値は3.4, ヒノキ①は2.82-4.77の範囲で, 平均値は3.78, ヒノキ②は2.86-4.91の範囲で, 平均値は3.74, アカマツは3.32-6.04の範囲で, 平均値は4.63, クロマツは3.68-6.34の範囲で, 平均値は5.16であった。樹幹流のpH平均値を高い順に並べると, クロマツ>アカマツ>ヒノキ>

スギの順であった。また林外雨より高い値を示した樹木はアカマツとクロマツであった。結果より, 針葉樹でも緩衝能がある樹木が存在することがわかった。

図6(b)に広葉樹の樹幹流pH値を示す。ミズキ①は4.47-6.09の範囲で, 平均値は5.31, ミズキ②は4.74-6.05の範囲で, 平均値は5.52, ケヤキ①は3.39-6.59の範囲で, 平均値は5.09, ケヤキ②は4.35-6.02の範囲で, 平均値は5.34, ヤマザクラ①は3.93-6.89の範囲で, 平均値は4.83, ヤマザクラ②は4.12-6.33の範囲で, 平均値は4.99, モウソウ竹は3.35-5.67の範囲で, 平均値は4.3であった。樹幹流のpH平均値を高い順に並べると, ミズキ>ケヤキ>ヤマザクラ>モウソウ竹の順であった。今回調査した広葉樹は全て林外雨より高い値であることがわかった。また, 調査した広葉樹の樹木は全てpH4.5-5.5の範囲にあった。

針葉樹のスギは3.0-3.5の範囲, ヒノキは3.5-4.5の範囲, アカマツは4.5-5.0の範囲で, クロマツは4.5-5.5の範囲にpH値が集中しており, 同じ針葉樹でも樹種によりpH域に差があることがわかった。しかし広葉樹の場合は, 樹種が異なってもpH域がほぼ同じ値であることがわかった。

樹幹流の水質は, 樹冠を形成している葉や枝にも物質(ちりやほこり等)が付着しているため, 樹冠にたどりついた雨水はこれらの物質を取り込みながら幹へ到達する。そして, 葉の表面を通過する際には, 葉自体から様々なものを洗い流す可能性がある。また幹には苔類や色々な微生物が生息しており, いろいろな代謝・分解産物も樹幹流の中に取り込まれると考えられる。また同じ樹種でも樹齢や樹勢によって異なってくるものと思われる。一般的に針葉樹の樹冠は, 広葉樹の樹冠に比べて大気中の物質を捕らえるのに効果的であると考えられている。本調査でも針葉樹のpH値が低い値を示した。なお針葉樹の樹幹流pH値は樹種ごとに一定の値域に収まっており, 林外雨のpH値とは異なった樹種固有のものであると推察される。

3.3 林外雨と林内雨, 樹幹流のEC値

図7に樹種別の林内雨と樹幹流のEC値を示す。針葉樹の林内雨は6.5-125.8 μ S/cmの範囲で平均値は32.26 μ S/cm, 広葉樹は4.8-122.0 μ S/cmの範囲で平均値は19.41 μ S/cm, モウソウ竹は11.3-98.0 μ S/cmの範囲で平均値は30.83 μ S/cmであった。

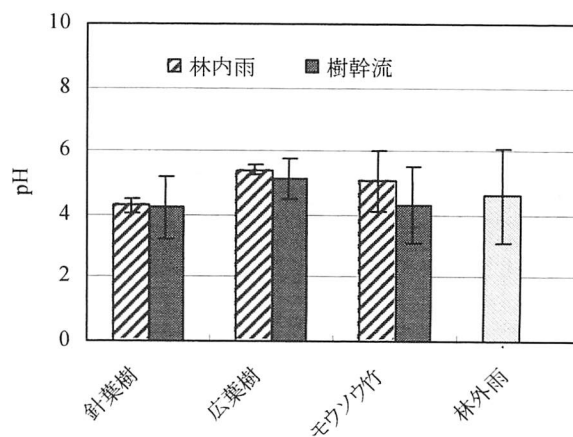


図7 林内雨と樹幹流の EC 値

針葉樹の林内雨は林外雨の約4倍、モウソウ竹は約3倍、広葉樹の約2倍であった。針葉樹の樹幹流は4.8-439.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は92.04 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、広葉樹は8.0-253.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は42.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、モウソウ竹は25.4-175.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は74.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。樹幹流のEC値は林外雨のEC平均値(9.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$)に比べ低い値であった。逆に林内雨に比べると、樹幹流のEC濃度が高い値を示すことがわかった。

図8(a)に針葉樹の樹種別樹幹流EC発生割合を示す。スギ①は28.3-439 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は260.55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、スギ②は13.3-497 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は185.56 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ヒノキ①は25.0-459.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は101.43 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ヒノキ②は12.7-380.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は96.77 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、アカマツは3.9-44.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は23.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、クロマツは6.3-55.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は20.89 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。樹幹流のEC平均値を高い順に並べるとスギ>ヒノキ>アカマツ>クロマツの順であった。同じ針葉樹でもスギとヒノキではECの変動幅が大きく、アカマツとクロマツの変動幅は小さいことがわかった。発生頻度別にみると、スギは1-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲に、ヒノキは100-200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲に、アカマツ・クロマツは1-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲に集中しており、同じ針葉樹でも樹木によりEC値が異なることが明らかになった。ECの変動幅が異なる要因としては、樹皮の構造や堅さが異なるため洗脱される物質に差があることと、樹体から溶脱される物質も異なるため、このような差になったと思われる。

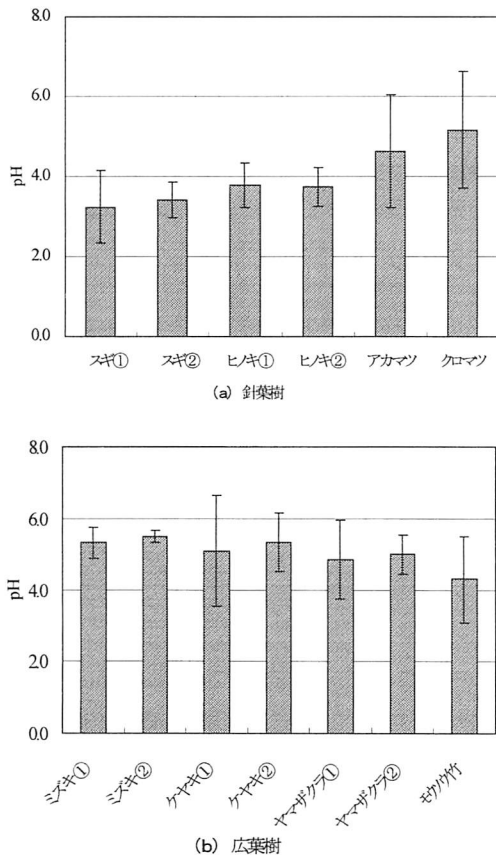


図8：針葉樹と広葉樹の発生割合

図8(b)に広葉樹の樹種別樹幹流EC発生割合を示す。ミズキ①は8.0-212.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は48.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ミズキ②は9.0-97.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は34.26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ケヤキ①は6.8-92.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は29.41 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ケヤキ②は7.5-169.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は42.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ヤマザクラ①は12.9- 253.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は47.23 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、ヤマザクラ②は10.3-177.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は55.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、モウソウ竹は24.6-236.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲で平均値は74.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。

樹幹流のEC平均値を高い順に並べるとモウソウ竹>ヤマザクラ>ミズキ>ケヤキの順であった。同じ樹木でもミズキ、ケヤキ、ヤマザクラではEC値の変動幅が大きかった。発生割合別にみると、広葉樹は調査した全ての樹木でEC値が10-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲に集中していた。

針葉樹の樹幹流pH値は、樹木によりバラツキが確認された。EC値においてもpH値と同様に、樹木によるバラツキがみられた。広葉樹は針葉樹と異なり、pH値、EC値とも樹木による発生割合のバラツキは大きくなかった。図9に樹幹流のpH値とEC値の関係を示す。針葉樹の樹幹流に関しては、pH値が低い値を示す樹種はEC値が高い値であった。しかし広葉樹の樹幹流は、針葉樹の樹幹流と反対にpH値が高い値を示す樹木はEC値も高い値を示した。

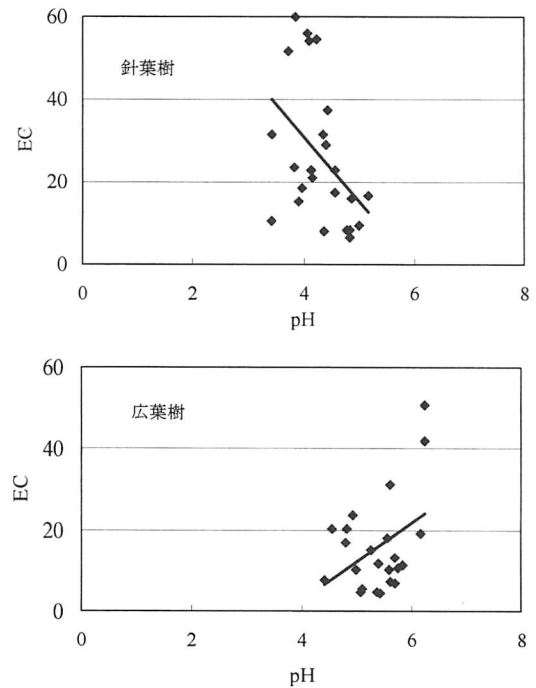


図9：樹幹流のpH値とEC値の関係

3.4 林内雨・樹幹流の化学性

降雨中の溶存元素量は樹冠を通過する際に、樹冠による遮断や蒸発あるいは樹体からの降雨による溶脱等により変化するため、林外雨と樹幹流の水可溶性成分の濃度比を表2に示す。

樹幹流、林外雨(雨水)に対する酸性化は、①樹冠による遮断や蒸発によるイオン濃度の濃縮、②樹冠に付着した乾性沈着物の降雨による洗脱、③樹体からの降雨による溶脱によるイオン濃度の増加、④葉および葉面に生息す

る微生物による吸収、⑤葉の吸収によるイオン濃度の減少の5つの作用により変化する。

全ての樹種において K^+ が高い濃度比を示していることから、樹体から K^+ の溶脱が多いと考えられる。その他に、スギとヒノキは降雨に対する SO_4^{2-} の濃度比が高い値を示しており、降雨の酸性化の影響をうけていることが明らかになった。樹幹流の濃度を高い順に並べると、スギ>ミズキ>ヤマザクラ>モウソウ竹>ケヤキ>クロマツ>アカマツの順であることが確認された。

表2: 林外雨に対する樹幹流の濃度比

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	NO_3^{2-}	SO_4^{2-}
アカマツ	3.6	12.3	5.1	2.4	6.0	1.6
クロマツ	8.2	13.7	9.5	3.9	1.6	1.4
スギ	6.9	38.2	23.6	23.0	6.7	9.6
ヒノキ	5.7	20.1	11.7	7.9	34.8	7.5
ミズキ	3.3	137.4	16.7	18.5	17.1	6.3
ケヤキ	3.1	114.2	15.0	13.3	6.1	3.5
ヤマザクラ	6.1	79.5	20.4	18.1	14.9	5.3
モウソウ竹	2.6	132.2	15.6	9.3	20.6	4.6

4 まとめ

降雨に対する10種類の樹種における酸中和能についての調査結果をまとめた。

- ① 林外雨のpH平均値は4.59であり、調査期間中一度も酸性雨のpH基準値(pH5.6)を上回らなかった。
- ② 林外雨のイオン組成は、全体の60%を NO_3^- と SO_4^{2-} が占めていた。
- ③ 針葉樹では樹種によりpH域のバラツキが認めら

れたが、広葉樹は全ての樹種で5.0-6.0の範囲に集中していた。

- ④ 広葉樹のpH値は、林外雨pH値より高い値を示しており、緩衝能があると思われる。
- ⑤ 針葉樹では、スギ・ヒノキのpH値は林外雨より低い値を示した。アカマツ・クロマツは林外雨よりも高いpH値を示し、酸性雨に対して緩衝能があることが分かった。
- ⑥ 樹幹流のイオン濃度比は、ヒノキ以外の樹種は、 K^+ が高い割合であった。

以上より、針葉樹と広葉樹ともに樹種による酸中和特性があきらかになった。降雨量や降雨時期、降雨強度による影響が考えられるが、同地点にある針葉樹と広葉樹でpHおよびEC、イオン濃度などが異なっていたことから、樹種による違いがあることがわかった。樹幹流は樹木の根系に与える影響が大きいと思われる。しかし、現在の樹幹流問題はまだ解明されていないため、今後調査研究が必要であると思われる。

引用文献

- [1] 江崎次夫, 河野修一, 藤久正文, 福島忠雄, 岩本徹, 朴完根, 幸喜善福(1998): 樹幹流の樹種特性と季節変動, 日本雨水資源化システム学会誌, Vol.3.No2, 25-32.
- [2] 環境庁地球環境部(1996): 酸性雨—地球環境の行方—, 中央法規出版, 1-21.
- [3] 河野修一, 藤久正文, 井上章二, 岩本徹, 江崎次夫, 全権雨, 幸喜善福, 中島勇喜(2000): 緑化樹木の樹幹流に及ぼす酸性雨の影響, 日本雨水資源化システム学会誌, Vol.6. No 1, 33-36
- [4] 村野健太郎(1993): 酸性雨と酸性霧, 裳華房, 61-83.
- [5] 玉置元憲, 小山功(1991): 地上から見た日本の酸性雨, 大気汚染学会誌, 26, 1-22,

[受付 2006年2月1日, 受理 2006年7月2日]